

УДК 62-83

М. С. Нікорюк*, канд. техн. наук,**В. М. Карпенко****, канд. техн. наук

*Донецький національний технічний університет, м. Покровськ,

**Національна акціонерна компанія «Нафтогаз України», м. Київ

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ФОРМУВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

У роботі розглянуті принципи формування перехідних процесів в системах автоматичного керування двигунів постійного струму з послідовним збудженням. Розроблений алгоритм формування напруги живлення дозволяє отримати бажаний закон зміни моменту двигуна, що обмежує динамічні навантаження в елементах кінематичних ланок.

Ключові слова: *бурова установка, система підйимального агрегату, електропривод, система Г-Д, двигун, пуск, напруга на затискачах двигуна, керування зміною напруги.*

Вступ. Проблемами математичного моделювання і оптимізації за допомогою засобів обчислювальної техніки дизель-генераторних електроприводів у всьому світі займаються вже майже півстоліття. Але далеко не всі задачі, що сформульовані десятиліттями до цього, вдалося вирішити з необхідною точністю навіть для тягових приводів постійного струму [1]. Особливості роботи підйимальних агрегатів стаціонарних бурових установок накладають на систему управління двигунами наступні вимоги - мінімізувати під час пуску-зупинки перенавантаження: механічні в редукторах і талевій системі, гідродинамічні у свердловині, електродинамічні в якірному ланцюгу.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Проблемами математичного моделювання і оптимізації за допомогою засобів обчислювальної техніки дизель-генераторних електроприводів у всьому світі займаються вже майже півстоліття. Але далеко не всі задачі, що сформульовані десятиліттями до цього, вдалося вирішити з необхідною точністю навіть для тягових приводів постійного струму [1]. Особливості роботи підйимальних агрегатів стаціонарних бурових установок накладають на систему управління двигунами наступні вимоги — мінімізувати під час пуску-зупинки перенавантаження: механічні в редукторах і талевій системі, гідродинамічні у свердловині, електродинамічні в якірному ланцюгу.

У зв'язку з розвитком елементної бази та появою програмних засобів значно поширився інтерес до систем модального керування

(СМК) зі спостерігачем стану (СС), який використовуються для оцінювання значення координат, які не можливо або дуже важко контролювати за допомогою відповідних датчиків. Основу СС складає модель об'єкта. СС визначає координати об'єкту і, як сигнали зворотних зв'язків, заводять їх в середину тієї частини СМК, модель якої покладена в основу СС. Таке використання СС не дозволяє в повній мірі використати можливості цих моделей.

В [2, 3] запропоновано використати математичні моделі об'єктів для формування перехідних процесів з керованим зростанням струму та практично з нульовим перерегулюванням. Розроблені моделі застосовуються лише для двигунів постійного струму з незалежним збудженням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формування перехідного процесу в системах високої керованості, що засновані на регулюванні напруги в колі якоря двигуна постійного струму, дозволяє формувати оптимальні перехідні процеси [2–4]. В [2, 3] запропонований наступний алгоритм формування керуючого впливу, що відпрацьовується системою керування автоматично. На першому етапі формується такий закон зміни напруги живлення, що забезпечує досягнення максимально припустимих значень струму, моменту з керованою швидкістю із найменшим перерегулюванням; на другому — забезпечується рух привода зі сталим прискоренням, струм, момент є незмінними; на третьому етапі відбувається рух при незмінній напрузі на затисках двигуна. Запропонований алгоритм може бути використаний лише для двигунів постійного струму з незалежним збудженням.

Формування перехідних процесів двигунів постійного струму послідовного збудження, запропоноване в [4], що визначене попередньо чисельними методами для фіксованого навантаження, дозволяє лише обмежити максимальні струм, момент, потік двигуна для фіксованого навантаження, але не дозволяє належним чином його формувати на усіх етапах перехідного процесу.

Постановка завдання. На рис. 1 приведена структурна схема керованого електропривода бурової лебідки ЛБ-650 Е.

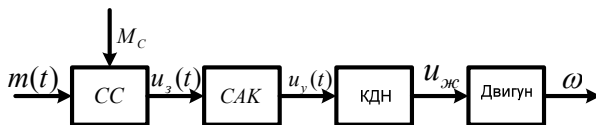


Рис. 1. Структурна схема електропривода бурової лебідки ЛБ 650 Е

На цьому рисунку: СС — математична модель двигуна постійного струму з послідовним збудженням, що визначає напругу живлення, САК — система автоматичного керування напруги живлення двигунів, КДН — кероване джерело напруги, $m(t)$ — завдання, що

визначає закон зміни моменту двигуна, $u_s(t)$ — напруга живлення двигуна (пропорційна), що дозволяє отримати заданий закон зміни моменту двигуна, $u_{ж}$ — напруга на затискачах двигуна.

У роботі поставлені наступні задачі:

1. Розробити математичну модель *СС* двигуна постійного струму з послідовним збудженням, що визначає напругу на його затискачах для формування заданого закону зміни моменту двигуна.
2. Розробити MATLAB — модель дослідження перехідних процесів пуску системи автоматичного керування моменту двигунів постійного струму з послідовним збудженням із спостерігачем стану (блоком визначення напруги живлення двигунів за заданим моментом двигунів);
3. Провести дослідження перехідних процесів пуску двигунів бурової лебідки ЛБ 650 Е і визначити максимальні навантаження елементів силового електроприводу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Добре відомо, що формування пуску двигунів за лінійним законом з регулюванням швидкості зростання моменту забезпечує плавне навантаження механічної частини електропривода (обмеження першої похідної струму та моменту двигуна) і є одним з найбільш простих шляхів рішення завдання обмеження навантаження елементів силового електропривода [5]. Зменшення швидкості зростання моменту двигуна забезпечує зменшення динамічного навантаження механічної частини електропривода. Для підтримки максимальної продуктивності в електроприводах, в яких змінюється і навантаження і момент інерції привода, необхідно регулювання швидкості зростання моменту двигуна.

На рис. 2 показана спрощена структурна схема системи автоматичного керування напруги живлення силової частини перспективного електроприводу системи підйимального агрегату бурової установки [6]. Силова частина системи побудована по принципу Г-Д із двома двигунами послідовного збудження, які включені послідовно поміж собою та генератором. Двигуни працюють на загальний вал, що з'єднаний із барабаном лебідки.

Розроблений перспективний варіант силового приводу підйимального агрегату має технічні характеристики, які приведені в [4].

Перспективний варіант силового електроприводу системи підйимального агрегату бурової установки з лебідкою ЛБ-650Е дозволяє здійснити як підйом бурильної колони з регулюванням швидкості, так і її спуск — з електричним гальмуванням і регулюванням швидкості спуска.

Динамічний режим роботи двигуна постійного струму з послідовним збудженням моделюється відомими рівняннями [5]:

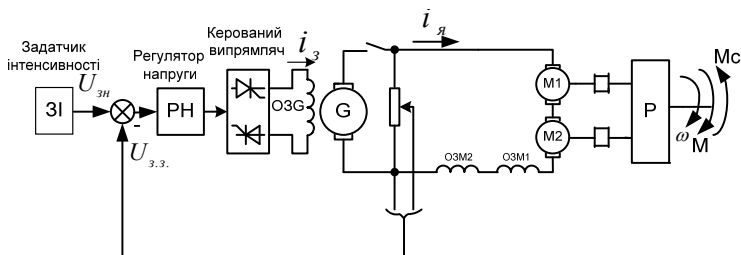


Рис. 2. Структурна схема системи автоматичного керування напруги живлення приводу бурової лебідки

$$\begin{cases} 0 = i_{\text{в.м.}} \cdot R_{\text{в.м.}} + W_{\text{в.м.}} \cdot \frac{d\Phi}{dt}; \\ U_{\text{я}} = k\Phi\omega + i_{\text{я}} \cdot R_{\text{яд}} + L_{\text{яд}} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} + W_{\text{в.}} \cdot \frac{d\Phi}{dt}; \\ M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}; \end{cases} \quad (1)$$

де $i_{\text{в.м.}}$ — умовний вихровий струм; $R_{\text{в.м.}}$ — опір короткозамкненої обмотки вихрових струмів; $w_{\text{в.м.}}$ — умовна кількість витків короткозамкненої обмотки вихрових струмів, $k = p_n \cdot N / 2\pi \cdot a$ конструктивна стала двигуна; p_n — кількість пар полюсів обмотки збудження; N — кількість активних провідників якоря двигуна; a — кількість паралельних витків якірної обмотки; ω — кутова швидкість, $i_{\text{я}}$ — струм якірного кола двигуна, $R_{\text{яд}}$ — опір якірного кола двигуна, $L_{\text{яд}}$ — сумарна індуктивність розсіювання якоря, додаткових полюсів і компенсаційної обмотки, $w_{\text{в.}}$ — кількість витків обмотки збудження, M — момент двигуна, M_c — момент сили опору, J — момент інерції двигуна.

Параметри контуру регулювання напруги надані в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри контуру регулювання напруги електропривод бурової лебідки ЛБ-650 Е

Індуктивність головних полюсів $L_{\text{гн}}$, Гн	Електричний опір збудження $R_{\text{з}}$, Ом	Стала часу $T_{\text{з}}$, сек.	Напруга живлення збудження номін. U , В	Напруга генератора ном./макс $U_{\text{г}}$, В	Коефіц. підсилення генератора $K_{\text{г}}$, В/А
0,1304	0,82	0,159	85	636/870	13,3

Генератор системи (рис. 2) розглядається як лінійна ланка. Тому коефіцієнт підсилення генератора рахується незмінним.

Передавальна функція генератора

$$W_{\varepsilon} = \frac{K_{\varepsilon}}{T_{32}p + 1}. \quad (2)$$

Для компенсації електромагнітної інерційності обмотки збудження генератора в системах підпорядкованого регулювання використовуються регулятори напруги, передавальні функції яких визначається формулою:

$$W_{pн} = \frac{T_{32}p + 1}{T_{\mu}p}, \quad (3)$$

де $T_{\mu} = 0,05$ сек. — мала стала часу. Визначення T_{μ} є попереднім.

Для живлення обмотки збудження генератора використовується керований випрямляч, який при моделюванні рахуємо безінерційним. Тому його передавальна функція

$$W_{кв} = K, \quad (4)$$

де $K = \frac{U_{32.max}}{U_{6х.32.max}} = \frac{100}{10} = 10$ — коефіцієнт підсилення керованого випрямляча, $U_{32.max}$, $U_{6х.32.max}$ максимальні вихідна та вхідна напруги випрямляча.

$$\text{Коефіцієнт зворотного зв'язку } K_{3.3} = \frac{U_{6х.32.max}}{U_{\varepsilon.max}} = \frac{10}{1000} = 0,01.$$

Розглянута система автоматичного керування напруги живлення двигунів є астатичною системою першого порядку. Вона відпрацьовує стрибок завдання без помилки, а сигнал що змінюється за лінійним законом з постійною помилкою.

Для практичного використання системи рівнянь (1) виключаємо вихровий струм $i_{в.т.}$ і вирішуємо цю систему відносно перших похідних змінних. Після перетворень отримаємо систему рівнянь для електроприводу в складі двох двигунів (5):

$$\begin{cases} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{R_{в.т.}}{W_{в.т.}} \left(i_{я} - \frac{\Phi}{k_{\Phi}} \right); \\ \frac{di_{я}}{dt} = \frac{E_{\varepsilon}}{2L_{я\Sigma}} - i_{я} \frac{T_{в.т.} + T_{в.}}{T_{в.т.} \cdot T_{я\Sigma}} - \frac{k \cdot \Phi \cdot \omega}{L_{я\Sigma}} + \frac{T_{в.} \cdot R_{я0}}{T_{в.т.} \cdot L_{я\Sigma}} \cdot \frac{\Phi}{k_{\Phi}}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M - Mc}{J} = \frac{2 \cdot k \cdot \Phi \cdot i_{я} - Mc}{J}; \end{cases} \quad (5)$$

де $T_{в.} = k_{\Phi} \cdot w_{в.} / R_{я0}$ — стала часу обмотки збудження двигуна;
 $T_{в.т.} = k_{\Phi} \cdot w_{в.т.} / R_{в.т.}$ — стала часу кола вихрових струмів,

$k_\Phi = \frac{\Phi}{i_\gamma + i_{\gamma.m.}}$ — коефіцієнт, що відповідає кривій намагнічування

двигуна, $T_{\gamma\Sigma} = \frac{L_{\gamma\Sigma}}{R_{\gamma\Sigma}}$ — стала часу якірного кола двигунів, $L_{\gamma\Sigma}$ —

сумарна індуктивність якірного кола двигунів; J — сумарний момент інерції механічної частини електроприводу.

Отримана система рівнянь (5) є нелінійною в зв'язку з наявністю добутку змінних $e = k\Phi\omega$ і $M = k\Phi \cdot i_\gamma$, а також нелінійної залежності потоку двигуна від струму збудження. Основна проблема, що виникає при рішенні системи рівнянь (5), пов'язана з урахуванням нелінійної залежності потоку від струму збудження. При рішенні цієї задачі нелінійна залежність враховується за допомогою коефіцієнта k_Φ , який є функцією сумарного струму $i_\gamma + i_{\gamma.m.}$.

За допомогою загальної кривої намагнічування двигуна ЕД 118 АУ2 функція $k_\Phi = f(\Phi)$, що обрахована в 24 точках розподілених рівномірно, була апроксимована поліномом третього порядку

$$k_\Phi = 7,977 \cdot 10^{-4} + 3,145 \cdot 10^{-3} \Phi - 2,662 \cdot 10^{-3} \Phi^2 + 5,723 \cdot 10^{-4} \Phi^3. \quad (6)$$

Ця поліноміальна функція доволі точно визначає залежність $k_\Phi = f(\Phi)$.

Для розрахунку напруги живлення дводвигунного електропривода бурової лебідки запропоновано наступний алгоритм.

1. Початковими даними є: залежність моменту двигунів $m(t)$, залишковий потік двигунів, момент навантаження M_c . Ці дані необхідно ввести в пам'ять блоку спостерігача стану (моделі двигуна, що визначає напругу живлення).
2. За залишковим значенням потоку двигунів Φ_z визначити коефіцієнт k_Φ за допомогою функції $k_\Phi = f(\Phi)$.
3. Розрахувати струм якірного кола $i_\gamma = \frac{M}{k\Phi_z}$.
4. За першим рівнянням системи рівнянь (2) визначити потік двигунів.
5. За рівнянням 3 системи рівнянь 2 розраховується кутова швидкість. При цьому на першому етапі пуску при підйомі колони враховується, що $\omega = 0$ якщо $M - M_c \leq 0$.
6. За другим рівнянням системи рівнянь (1) визначається напруга живлення двигунів $u_z(t)$.

На рис. 3 приведена блок-схема моделі двигунів (СС), що визначає напругу живлення двигунів електропривода бурової лебідки за завданням зміни моменту двигунів.

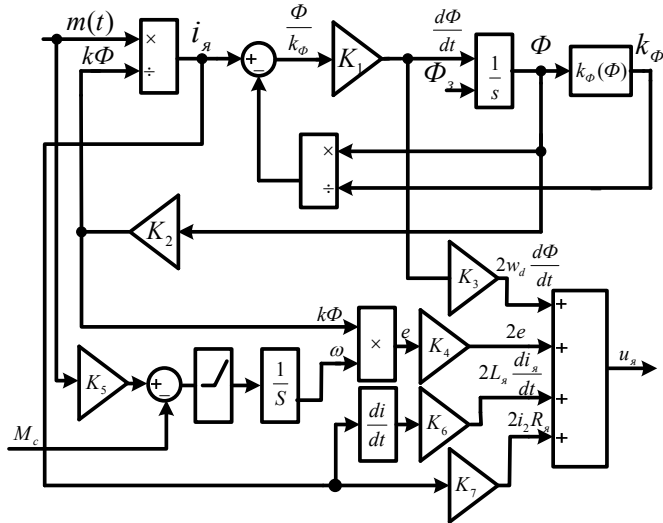


Рис. 3. Блок-схема моделі двигуна, що визначає напругу живлення двигуна за завданням зміни моменту дводвигунного електропривода

Розрахуємо коефіцієнти моделі (CC) рисунку 3:

$$K_1 = 10 \cdot \frac{R_{я0}}{w_{\phi}} = 10 \cdot \frac{0,033}{19} = 0,01737 \approx 0,0174, \text{ Ом};$$

$$K_2 = \frac{M_n}{\Phi_n I_n} = \frac{5215}{1,23 \cdot 720} = 5,89;$$

$$K_3 = 2 \cdot w_{\phi} = 2 \cdot 19 = 38; K_4 = 2; K_5 = 2;$$

$$K_6 = 2 \cdot L_{я0} = 2 \cdot 0,0014 = 0,0028, \text{ Гн};$$

$$K_7 = 2 \cdot R_{я0} = 2 \cdot 0,033 = 0,066, \text{ Ом}$$

де параметри двигунів: $R_{я0} = 0,033$, Ом — електричний опір якорного кола, $w_{\phi} = 19$ — кількість витків на полюс, $M_n = 5215$, Нм — номінальний момент; $\Phi_n = 1,23$, Вб — номінальний потік, $I_n = 720$, А — номінальний струм, $L_{я0} = 0,0014$, Гн — індуктивність якорного кола.

Для розрахунку значення коефіцієнта K_1 було враховано, що $T_{\phi, \text{м.}} \approx (0,1 \div 0,2) T_{\phi}$.

У відповідності до структурної схеми електропривода буровий лебідки ЛБ 650 Е (рис. 1) була розроблена Матлаб-модель дослідження перехідних процесів двигуна постійного струму з послідовним збудженням. Модель першого елемента — CC приведена на рис. 3, модель САК задається рівняннями (3), (4), модель КДН задається передавальною функцією генератора (2), модель дводвигунного

електропривода задається системою нелінійних рівнянь (5). Дослідження перехідних процесів пуску системи автоматичного керування електроприводу бурової лебідки (рис. 1) було виконане для найбільш важкого режиму роботи — підйом бурової колони з максимальним навантаженням: вага вантажу — 2000 кН. Розгін бурової колони здійснюється з максимальним прискоренням, тобто з найбільшим пусковим моментом до максимальної кутової швидкості. При пуску двигунів момент, що є завданням для СС, задається наступними умовами:

$$m(t) = \begin{cases} a \cdot t, 0 \leq t \leq 1, \text{ с}; \\ M_{\max} = M_{cm} = 18500, \text{ Нм}, 1 < t \leq 11, \text{ с}; \\ M_{\max} - a \cdot (t - 11), \text{ Нм}, 11 < t \leq 11 + \Delta t, \text{ с}, \\ M_c = 16710, \text{ Нм}, t \geq 11 + \Delta t, \end{cases}$$

де $a = 18500, \text{ Нм/с}$ — швидкість зростання (зменшення) моменту двигунів, Δt — час зменшення моменту двигунів від максимального до моменту опору.

На рис. 4,а приведені результати розрахунку напруги живлення, що визначена моделлю двигунів (СС). Похибка визначення напруги САК дана на рис. 4,б. Ця похибка визначається рівнянням:

$$\Delta u = u_z(t) - u_{жс}(t),$$

де $u_z(t)$ — вихідна напруга моделі двигунів постійного струму з послідовним збудженням (СС), $u_{жс}(t)$ — вихідна напруга керованого джерела напруги (генератора системи Г-Д).

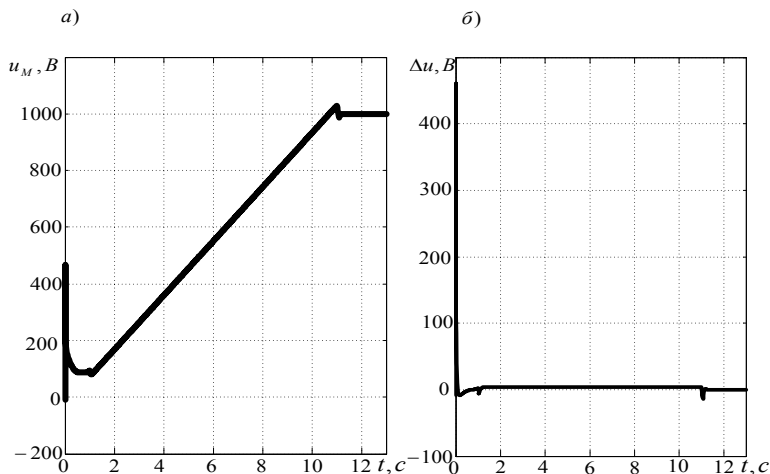


Рис. 4. Результати розрахунків: а) вихідної напруги СС; б) похибки визначення напруги системою Г-Д $\Delta u = u_z(t) - u_{жс}(t)$

Розглянемо характер зміни вихідної напруги моделі двигунів (СС). Так, в момент часу $t = 0+$, напруга за результатами розрахунків повинна стрибком змінитися від 0 до -8 В, що є помилкою. Ця помилка обумовлена використанням в моделі СС ланки диференціювання (рис. 3). В подальшому практично миттєво напруга зростає до 465 Вольт, а потім плавно зменшується до 86 В, і після невеликого коливання в момент часу $t = 1$ с вона починає зростати у відповідності до швидкості зростання моменту двигунів. Найбільша помилка у визначенні напруги живлення системою САК має місце на початку перехідного процесу. Ця помилка складає $\Delta u = 460$ В. Інерційна система Г-Д не в змозі миттєво зреагувати на стрибок завдання. На етапі сталого розгону ($1 \leq t \leq 11$, с) астатична система першого порядку відпрацьовую завдання зі сталою помилкою, що складає $\Delta u = 3,6$ В. На етапі руху з постійною швидкістю ($t \geq 11 + \Delta t$) помилка Δu дорівнює $\Delta u = 0$.

На рис. 5 приведені результати розрахунків перехідного процесу пуску двигунів системи автоматичного керування кутової швидкості бурової лебідки ЛБ 650 Е. Розраховані координати електропривода надаються у відносних одиницях: $M_{\partial*}$ — сумарний момент приводу, M_{c*} — момент опору механізму, $i_{\partial*}$ — струм якорного кола, $\omega_{\partial*}$ — кутова швидкість двигунів, та визначаються наступним чином:

$$M_{\partial*} = M_{\partial} / M_{\text{ном}}, M_{c*} = M_c / M_{\text{ном}}, i_{\partial*} = i_{\partial} / I_{\text{ном}}, \omega_{\partial*} = \omega_{\partial} / \omega_{\text{ном}}.$$

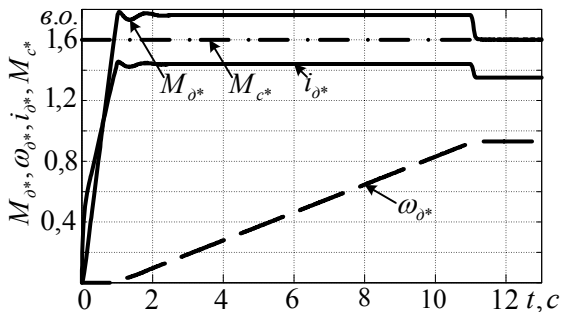


Рис. 5. Результати розрахунку перехідного процесу пуску двигунів електропривода бурової лебідки ЛБ 650Е

Максимальне значення моменту двигунів при пуску складає:

$$M_{\max} = M_{\max, \partial*} \cdot M_{\text{ном}} = 1,7849 \cdot 10430 = 18620, \text{ Нм}$$

стале значення моменту при розгоні ($1 < t \leq 11$) складає:

$$M_{ct} = M_{ct, \partial*} \cdot M_{\text{ном}} = 1,765 \cdot 10430 = 18400, \text{ Нм},$$

де максимальне значення моменту двигунів у відносних одиницях (рис. 5) $M_{\max, \partial*} = 1,7849$, стає значення моменту $M_{ct, \partial*} = 1,765$.

Таким чином, перерегулювання моменту двигунів складає:

$$\sigma = \frac{M_{\max} - M_{\text{ст}}}{M_{\text{ст}}} \cdot 100\% = \frac{18620 - 18400}{18400} \cdot 100\% = 1,2\%.$$

Перехідний електромагнітний процес відбувається практично без перерегулювання. Перехідний механічний процес відбувається також без коливань з нульовим перерегулюванням.

Максимальне значення вихідної напруги генератора складає 1050 В. Стале значення напруги генератора у режимі руху з постійною швидкістю складає 1000 В. Для форсування зростання напруги генератора від нуля до 465 В для моменту часу $t = 0+$ напруга живлення обмотки збудження генератора повинна бути $u_{(t=0+)} = 150$, В. В подальшому вона спадає до 77 В в сталому режимі руху.

Розглянемо як навантаження та швидкість зростання моменту (завдання) на першому етапі пуску впливають на характер перехідного процесу. На рис. 6 приведені результати розрахунків перехідних процесів пуску двигунів лебідки з навантаженням $M_c = 8000$, Нм, та швидкостями зростання моменту на першому етапі пуску:

1. $\frac{dm}{dt} = 18500, \frac{\text{Нм}}{\text{с}}$ (рис. 6, а),
2. $\frac{dm}{dt} = 29500, \frac{\text{Нм}}{\text{с}}$ (рис. 6, б).

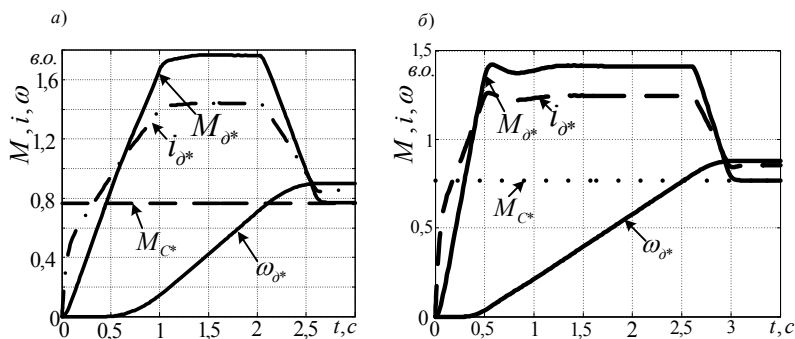


Рис. 6. Результати розрахунку перехідного процесу пуску двигунів електропривода бурової лебідки ЛБ 650Е з навантаженням $M_c = 8000$, Нм:

а) швидкість зростання завдання моменту $\frac{dm}{dt} = 18500, \text{Нм} / \text{с}$,

б) швидкість зростання моменту $\frac{dm}{dt} = 29500, \frac{\text{Нм}}{\text{с}}$

Перехідний процес пуску приводу з навантаженням $M_c = 8000$ Нм та швидкістю зростання моменту $\frac{dm}{dt} = 18500, \frac{\text{Нм}}{\text{с}}$ (рис. 6, а) проходить без коливань, перерегулювання кутової швидко-

сті, струму, моменту відсутні. При зростанні швидкості збільшення моменту (рис. 6, б) на першому етапі пуску двигунів ($0 \leq t \leq 0,5$, с) виникають коливання, але як і раніше перерегулювання не перевищує одного проценту. Розглянемо більш детально як формується напруга живлення двигунів у другому випадку (рис. 6, б).

На рис. 7 приведені результати розрахунку напруги живлення двигунів при пуску для швидкості зростання моменту $\frac{dm}{dt} = 29500, \frac{H_m}{с}$. В

момент часу $t = 0+$ вихідна напруга $CC u_3$ стрибком змінюється від нуля до -8 В. Це є помилка, що пов'язана з використанням ланки диференціювання. А потім вона стрибком зростає до 730 В і в подальшому спадає до 120 В. Починаючи з цього моменту напруга $CC u_3$ та напруга двигунів співпадають з малою похибкою. Найбільша похибка у визначенні напруги живлення $u_{ж}$ складає приблизно 725 В. Але цій похибки відповідає дуже мала тривалість часу, тобто вона практично не впливає на відтворення перехідного процесу за заданим закон зміни моменту двигунів.

Максимальне значення вихідної напруги генератора складає 850 В. Стале значення напруги генератора у режимі руху з постійною швидкістю складає 710 В. Для форсування зростання напруги генератора від нуля до 740 В в моменту часу $t = 0+$ напруга живлення обмотки збудження генератора повинна бути $u_{(t=0+)} = 225$, В. В подальшому вона спадає до 55 В в сталому режимі руху.

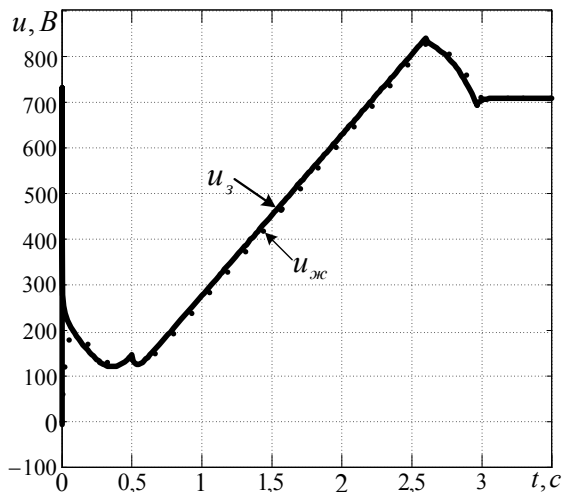


Рис. 7. Результати розрахунку напруги живлення двигунів

Проведені дослідження перехідних процесів з максимальним навантаженням свідчать, що двигуни електропривода бурової лебідки здатні

витримувати максимальні навантаження, що мають місце при підйомі колони максимальної довжини. В сталому режимі руху з максимальною швидкістю напруга живлення генератора ($U_{\text{г.ном}} = 636, \text{ В}$) обмежує можливості використання двигунів за швидкістю. Таким чином, номінальна напруга живлення генератора повинна бути $U_{\text{г.ном}} \geq 1000, \text{ В}$. Максимальна напруга, що обмежує темп зростання швидкості, повинна бути $U_{\text{г.макс}} \geq 1100, \text{ В}$. Максимальне значення напруги живлення обмотки збудження генератора визначається швидкістю зростання моменту при пуску. Так, для швидкості зростання моменту $\frac{dm}{dt} = 29500, \frac{\text{Нм}}{\text{с}}$ при пуску з навантаження ($M_c = 8000, \text{ Нм}$), максимальне значення напруги складає 225, В. Таким чином, максимальна напруга живлення обмотки збудження генератора повинна бути $U_{\text{з.г.макс}} \geq 250 \text{ В}$.

Висновки.

1. Запропонований новий підхід до формування перехідних процесів електричних двигунів. Він реалізується завданням бажаного закону зміни однієї із координат двигуна та визначенням за допомогою математичної моделі об'єкту керуючого впливу. Для двигуна постійного струму з послідовним збудженням задається закон зміни його моменту (струму) та визначається закон зміни напруги живлення.
2. Розроблена математична модель двигуна постійного струму з послідовним збудженням (СС), що дозволяє визначити керуючий вплив — напругу живлення двигуна по заданому закону зміни його моменту.
3. Розроблений алгоритм формування керуючого впливу двигуна постійного струму з послідовним збудженням реалізує заданий закон зміни моменту (струму) двигуна та дозволяє формувати перехідні процеси практично з нульовим перерегулюванням.

Перспективи подальших досліджень з даного напрямку.

1. Розробити замкнену систему керування електропривода з двигунами постійного струму з послідовним збудженням із використанням запропонованих способів формування перехідних процесів.
2. Розробити алгоритми формування перехідних процесів електроприводів із двигунами постійного струму з послідовним збудженням, що виключають виникнення пружних механічних коливань.
3. Спростити моделі спостерігача стану (СС) — двигуна постійного струму з послідовним збудженням.
4. Провести апробацію запропонованих методів формування перехідних процесів двигунів постійного струму з послідовним збудженням на фізичних моделях двигунів.

Список використаних джерел:

1. Носков В. И. Моделирование устройств системы управления асинхронным тяговым электроприводом дизель-поезда / В. И. Носков // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : збірник наукових праць. Тематичний випуск. Транспортне машинобудування. — Харків : НТУ «ХП», 2012. — № 20. — 144 с.
2. Карпенко В. Н. Розробка алгоритму формування керуючого впливу системи автоматичного керування електропривода бурової лебідки ЛБ 650 Е / В. Н. Карпенко, В. А. Есауленко, М. С. Нікорюк // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : збір. наук. праць. — Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2012. — Вип. 7. — С. 155–165.
3. Нікорюк М. С. Алгоритм формування перехідного процесу пуску двигуна постійного струму до кутової швидкості вище основної / М. С. Нікорюк, В. М. Карпенко // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : збір. наук. праць. — Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2013. — Вип. 8. — С. 89–98.
4. Нікорюк М.С., Карпенко В.М. Розробка алгоритму зміни напруги за датчика інтенсивності системи автоматичного керування електропривода бурової лебідки ЛБ-650 Е. / М. С. Нікорюк, В. М. Карпенко // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки : збір. наук. праць. — Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2014. — Вип. 10. — С. 127–135.
5. Чиликин М. Г. Теория автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. — М. : Энергия, 1979. — 616 с.
6. Карпенко В. М. Підймальний агрегат бурової установки (винахід) / В. М. Карпенко. — №20610.

The paper considers the principles of formation of transient processes in systems of automatic control of DC motors with series excitation. The algorithm of formation of the supply voltage allows to obtain the desired law of change of the engine torque, which limits the dynamic load in elements of kinematic links.

Key words: *drilling rig, the system of the hoisting unit, electric drive, the system G-D, the engine start, the voltage at the motor terminals, the control voltage change.*

Отримано: 02.03.2017